

非排水有効応力地震応答解析における捨石材のモデル化に関する検討 (その2)

佐藤成¹・林家祥²・亀山和弘³・佐藤靖彦⁴・飯田典生⁵・大塚夏彦⁶・土屋善浩⁷
森浩章⁸・小堤治⁹・井合進¹⁰・安田進¹¹

¹正会員 パシフィックコンサルタンツ (株) (〒163-0730 東京都新宿区西新宿 2-7-1)

²正会員 オリエンタルコンサルタンツ (株) (〒213-0011 川崎市高津区久本 3-5-7)

³正会員 五洋建設 (株) (〒栃木県那須郡西那須野町四区町 1534-1)

⁴正会員 西松建設 (株) (〒神奈川県大和市下鶴間 2570-4)

⁵正会員 日本港湾コンサルタント (株) (〒150-0022 東京都渋谷区恵比寿南 1-15-1)

⁶正会員 北日本港湾コンサルタント (株) (〒003-0029 札幌市白石区平和通 2-北 11-18)

⁷正会員 (株) エイトコンサルタント (〒700-0087 岡山市津島京町 3-1-21)

⁸正会員 (財) 沿岸開発技術研究センター (〒102-0092 千代田区隼人町 3-16)

⁹正会員 株式会社日本科学技術研修所 (〒151-0051 東京都渋谷区千駄ヶ谷 5-10-9)

¹⁰正会員 独立行政法人港湾空港技術研究所 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)

¹¹正会員 東京電機大学理工学部 (〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町石坂)

前報 (その1) で明らかとなった結果を基に水の体積弾性係数 K_f と c , ϕ'_f を設定し、兵庫県南部地震における六甲アイランド RF3 岸壁および神戸港第七防波堤、釧路沖地震における北釧路港岸壁の各被災断面を対象に地震応答解析を行い、被災後の観測結果との比較を行うことで評価を行った。その結果、 $c = 20$ (kPa), $\phi'_f = 35$ (°), $K_f = 0$ (kPa) で基礎捨石および裏込石をモデル化することにより、ケーソンの残留変位量は、より観測値に適合する結果が得られ、その妥当性が確認された。

KeyWords : *dynamic, effective stress model, finite element analysis, rubble material*

1. はじめに

(その1) では基礎捨石および裏込石に着目した想定モデルを対象にパラメータスタディーを行い、モデル化の方法についての検討を行った。その結果から、表-1 に示すパラメータを用いることで、低拘束圧条件におけるせん断強度特性を忠実に反映し、かつ、高透水性に配慮した性状を再現することが可能であると考えられる。本報告は、過去の被災断面を対象として2次元地震応答解析を実施し、観測結果との比較を行うことによりモデル化の妥当性について検証を行うものである。

表-1 基礎捨石および裏込石の一般的な解析定数

ρ_s (t/m ³)	G_{ms} (kPa)	σ'_{ms} (kPa)	c (kPa)	ϕ'_f (°)
2.0	180000	98	20	35

※水の体積弾性係数 $K_f = 2.2 \times 10^6$ (kPa) 以下の小さい値

2. RF3 岸壁被災断面を対象とした解析

今回対象とした RF3 岸壁は、被災時には水深 8.5m, 設計震度 0.15 の重力式岸壁であった。岸壁の被災状況を図-1 に示す。FEM メッシュおよび土層区分、物性番号を図-2, 基本ケースの解析パラメータを表-3 に示す。これらの値は被災後に実施された PS 検層および凍結サンプリング試料による各種

試験により設定した。また、入力地震動は神戸開発局が設置したポートアイランドの鉛直アレー地震観測網による 1995 年兵庫県南部地震の際の GL-32m の地震計の NS 成分と UD 成分の記録波形を用いた。

表-2 に基礎捨石および裏込石の物性を変化させた 4 ケースを一覧で示す。CASE1 は従来行われてきたものであり、CASE4 が表-1 の物性である。

表-2 検討ケース一覧

検討ケース	せん断強度特性 c , ϕ'_f	水の体積弾性係数 K_f
CASE 1	$c = 0$ (kPa), $\phi'_f = 40$ (°)	2.2×10^6 (kPa)
CASE 2	$c = 20$ (kPa), $\phi'_f = 35$ (°)	2.2×10^6 (kPa)
CASE 3	$c = 0$ (kPa), $\phi'_f = 40$ (°)	0 (kPa)
CASE 4	$c = 20$ (kPa), $\phi'_f = 35$ (°)	0 (kPa)

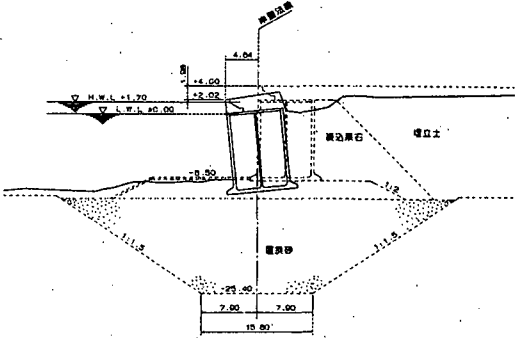


図-1 六甲アイランド RF3 岸壁被災断面

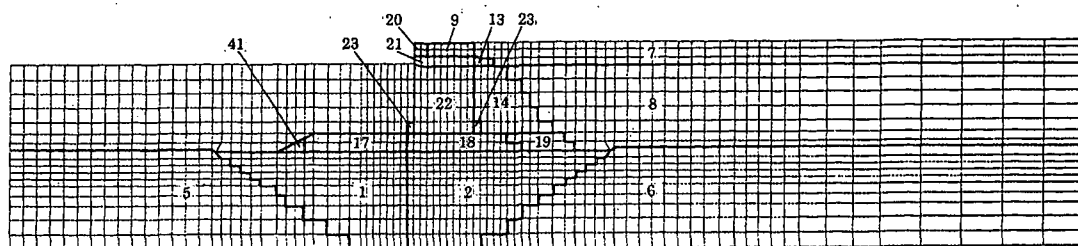


図-2 RF3岸壁モデルFEMメッシュ図

表-3 地盤の解析定数

物性 番号	地盤	ポアソン 比 ν	密度 ρ (t/m^3)	間隙率 n	最大減 衰定数 h_{max}	粘着力 c (kPa)	内部摩 擦角 ϕ'_f ($^\circ$)	初期せ ん断弾 性係数 G_{ma} (kPa)	初期体 積弾性 係数 K_{ma} (kPa)	G_0K_0 に対応 する平均有 効応力 σ'_{ma} (kPa)	G,Kに関する パラメータ	
											m_K	m_G
7,9	埋立土 (地下水面)	0.33	1.8	0.45	0.3	0	36	79380	207000	63	0.5	0.5
8	埋立土	0.33	1.8	0.45	0.3	0	36	79380	207000	63	0.5	0.5
1,2	置換砂	0.33	1.8	0.45	0.3	0	37	58320	152000	44	0.5	0.5
5,6	粘性土	0.33	1.7	0.45	0.3	0	30	74970	195500	143	0.5	0.5
17,41	基礎捨石	0.33	2.0	0.45	0.3	0	40	180000	469000	98	0.5	0.5
18	基礎捨石	0.33	2.0	0.45	0.3	0	40	180000	469000	98	0.5	0.5
13,14,19	裏込石	0.33	2.0	0.45	0.3	0	40	180000	469000	98	0.5	0.5
物性 番号	地盤	変相角 $\phi_D(^\circ)$	液状化パラメータ									
			S_1	W_1	P_1	P_2	C_1					
8	埋立土	28	0.005	6.0	0.5	0.8	2.43					
1,2	置換砂	28	0.005	4.0	0.6	0.6	2.35					

※ $G_0 = G_{ma} (\sigma'_m / \sigma'_{ma})^{m_G}$ $K_0 = K_{ma} (\sigma'_m / \sigma'_{ma})^{m_K}$

表-4 に主要な応答結果を示す。従来の設定方法である CASE1 に比べ、CASE2～CASE4 は大きな残留変位となっている。このうち、提案方法である CASE4 が最も観測データに近い結果を与えている。

表-4 主な応答結果および観測値

ケース	ケーソン残留変位量			ケーソン最大応答加速度	
	$\delta_H(m)$	$\delta_V(m)$	$\theta(^\circ)$	$\alpha_H(Gal)$	$\alpha_V(Gal)$
CASE1	2.83	1.06	2.64	278	306
CASE2	3.82	1.80	3.71	274	309
CASE3	6.10	2.11	10.6	315	387
CASE4	4.33	2.00	4.69	364	317
観測値	4.1～ 4.6	1.7～ 2.0	4.1～ 5.1	—	—

図-3 に残留変形モード図の例を示す。また、図-4 および図-5 に残留変位の分布状況を示す。これによると、CASE3 では基礎捨石自体が大きく変形してケーソンの残留変位を大きくしていることがわかる。これは（その1）での検討で明らかのように、ケーソン周辺要素の一部が低拘束圧条件で破壊領域に達するためと考えられる。一方、CASE2 および CASE4 ではマウンド下の置換砂が CASE1 に比べ、より大きく変形しているためにケーソンの残留変位が大きくなっている。従来設定方法である CASE1 と今回提案の CASE4 との差異は、基礎捨石材のせん断強度特性が変更された結果、置換砂への応力の伝達が大きくなり、変形が大きくなったことが大きな要因と考えられる。

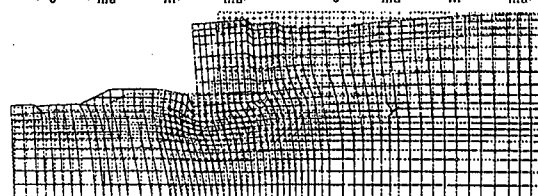


図-3 変形モード図(CASE4)

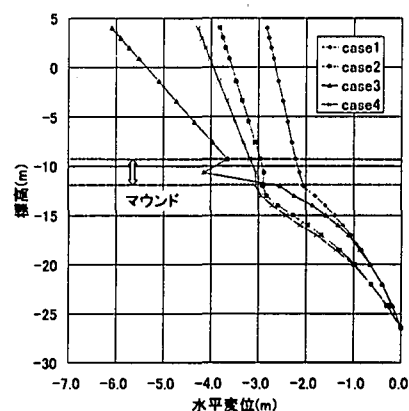


図-4 岸壁法線位置での水平変位分布

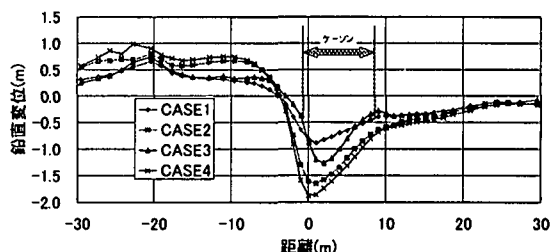


図-5 マウンド下端深度での鉛直変位分布

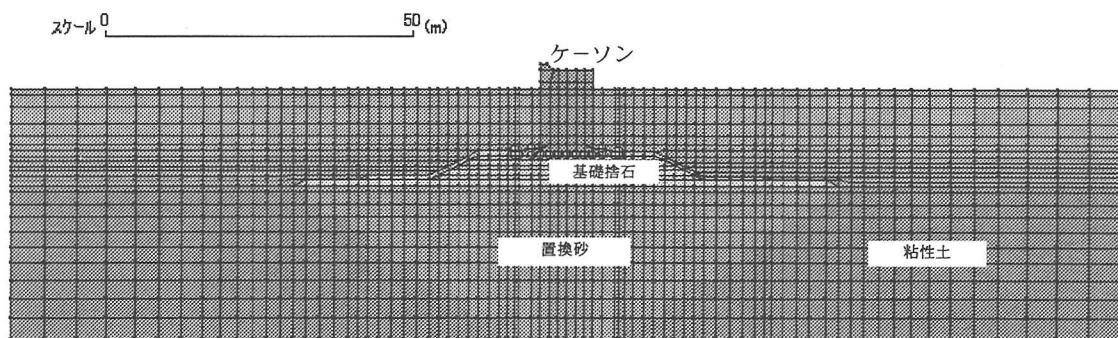


図-6 神戸港第七防波堤モデル FEM メッシュ図

表-5 地盤の解析定数

地盤	ポアソン比 ν	密度 ρ (t/m^3)	間隙率 n	最大減衰定数 $h_{\max}$	粘着力 C (kPa)	内部摩擦角 ϕ'_r ($^\circ$)	初期せん断弾性係数 G_{ma} (kPa)	初期体積弾性係数 K_{ma} (kPa)	G_0, K_0 に対応する平均有効応力 σ'_{ma} (kPa)	G,Kに関するパラメータ	
										m_K	m_G
置換砂	0.33	1.8	0.45	0.3	0	36	115800	302000	102	0.5	0.5
粘性土	0.33	1.7	0.45	0.3	0	30	74970	195500	143	0.5	0.5
基礎捨石	0.33	2.0	0.45	0.3	0	40	180000	469000	98	0.5	0.5
地盤	変相角 ϕ_p ($^\circ$)	液状化パラメータ									
		S_1	W_1	P_1	P_2	C_1					
置換砂	28	0.005	30.0	0.65	1.03	3.60					

3. 神戸港第七防波堤被災断面を対象とした解析

1995 年兵庫県南部地震で被災した神戸港第七防波堤の断面を対象に解析を行った。図-7 に被災状況を示す。この防波堤は、厚さ 25m の置換砂の上に建設され、地震後 1.4~2.6m 沈下したが、法線の出入りは 0.6m 程度であった。FEM メッシュおよび土層区分を図-6、基本ケースの解析パラメータを表-5 に示す。なお、入力地震動は RF3 岸壁と同様に、ポートアイランドの鉛直アレー地震観測網による 1995 年兵庫県南部地震の際の GL-32m の地震計の NS 成分と UD 成分の記録波形を用いた。

表-6 に解析の結果得られた残留変位量を示す。CASE3 以外はほぼ同等の残留変位量となっており、観測値との適合性も高い。図-8 および図-9 に残留変形モード図と最大過剰間隙水圧比分布を示す。これによると、ケーソンが捨石マウンドにめり込むように沈下し、マウンド自体もそれに引込まれるように変形している観測結果と整合する。また、置換砂の過剰間隙水圧比は表層 4~5m の範囲で 0.9 以上となっているが、それ以深は比較的過剰間隙水圧が発生していない。これは、この箇所の置換砂が比較的大きな液状化強度特性を有しているためである。仮に排水による沈下量を 5m の層厚に対して 5% 考慮したとしても 25cm とわずかである。したがって、排水による沈下量がそれほど大きくないと考えれば、CASE3 以外のケースにおける計算結果はほぼ被災状況をシミュレートしているといえる。

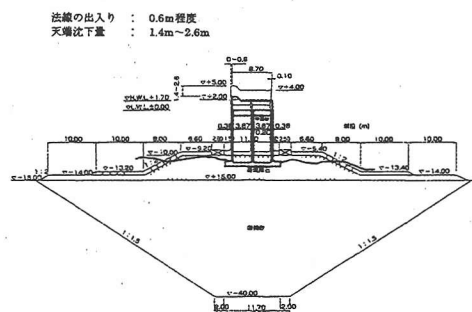


図-7 神戸港第七防波堤被災断面

表-6 検討ケース一覧

検討ケース	せん断強度特性 c, ϕ'_r	水の体積弾性係数 K_f
CASE 1	$c=0$ (kPa), $\phi'_r=40$ ($^\circ$)	2.2×10^6 (kPa)
CASE 2	$c=20$ (kPa), $\phi'_r=35$ ($^\circ$)	2.2×10^6 (kPa)
CASE 3	$c=0$ (kPa), $\phi'_r=40$ ($^\circ$)	2.2×10^4 (kPa)
CASE 4	$c=20$ (kPa), $\phi'_r=35$ ($^\circ$)	2.2×10^4 (kPa)

表-7 ケーソン天端の残留変位

	CASE1	CASE2	CASE3	CASE4
水平変位(m)	0.07	-0.04	-0.04	0.00
鉛直変位(m)	-2.00	-1.84	-4.39	-2.26

※ 水平変位は、港内側が正、鉛直変位は沈下が負

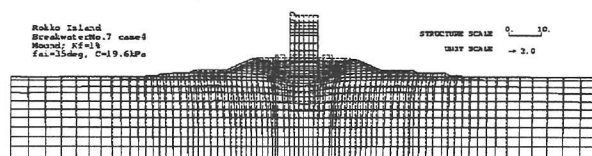


図-8 残留変形モード図(CASE4)



図-9 最大過剰間隙水圧比分布図(CASE4)

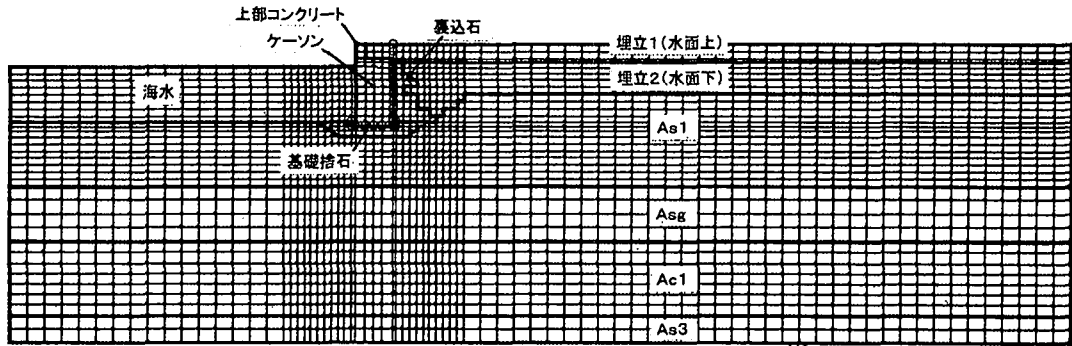


図-10 FEMメッシュ図

表-8 地盤の解析定数

地盤	ポアソン比 ν	密度 ρ (t/m^3)	間隙率 n	最大減衰定数 h_{max}	粘着力 c (kPa)	内部摩擦角 ϕ'_r ($^\circ$)	初期せん断弾性係数 G_{ma} (kPa)	初期体積弾性係数 K_{ma} (kPa)	G_0, K_0 に対応する平均有効応力 σ'_{ma} (kPa)	G, Kに関するパラメータ	
										m_K	m_G
埋立土	0.33	1.8	0.45	0.24	0	38	29790	77800	33	0.5	0.5
As1	0.33	1.8	0.45	0.24	0	41	108000	282000	98	0.5	0.5
Asg	0.33	1.9	0.45	0.24	0	44	72800	190000	65	0.5	0.5
Ac1	0.33	1.6	0.45	0.2	0	44	72800	190000	65	0.5	0.5
As3	0.33	2.0	0.45	0.24	0	44	72800	190000	65	0.5	0.5
基礎捨石	0.33	2.0	0.45	0.3	0	40	180000	469000	98	0.5	0.5
裏込石	0.33	2.0	0.45	0.3	0	40	180000	469000	98	0.5	0.5
地盤	変相角 ϕ_p ($^\circ$)	液状化パラメータ									
		S_1	W_1	P_1	P_2	C_1					
埋立土	28	0.005	3.6	0.5	1.02	1.6					
As1	28	0.005	9.2	0.6	0.92	1.3					

$$G_0 = G_{ma} (\sigma'_m / \sigma'_{ma})^{m_G} \quad K_0 = K_{ma} (\sigma'_m / \sigma'_{ma})^{m_K}$$

4. 釧路港北ふ頭岸壁被災断面を対象とした解析

1993年釧路沖地震において被災した釧路港北ふ頭岸壁を対象に解析を行った。図-11に被災状況を示す。置換砂はなく、基礎捨石以深は原地盤である。この断面では、はらみ出し量0.8~1.6m、沈下量0.2~0.5mの残留変位が観測されている。

FEMメッシュおよび土層区分を図-10、基本ケースの解析パラメータを表-8に示す。なお、入力地震動は地中地震計(GL-77m)で記録されたNS成分の記録波形(最大加速度204Gal)を用いた。検討ケースを表-9に、また、表-10に主な応答結果および観測値との比較を示す。これによると、残留変位量が小さく、あまり大きな差異は認められないが、提案方法であるCASE3がより観測値に近い結果を与えている。

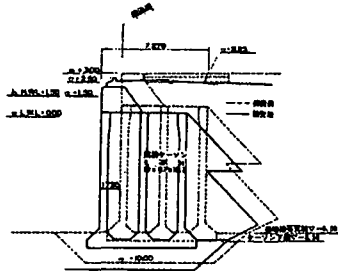


図-11 釧路北ふ頭岸壁被災断面

表-9 検討ケース一覧

検討ケース	せん断強度特性 c, ϕ'_r	水の体積弾性係数 K_f
CASE1	$c=0$ (kPa), $\phi'_r=40$ ($^\circ$)	2.2×10^6 (kPa)
CASE2	$c=20$ (kPa), $\phi'_r=35$ ($^\circ$)	2.2×10^6 (kPa)
CASE3	$c=20$ (kPa), $\phi'_r=35$ ($^\circ$)	0 (kPa)

表-10 主要な応答結果および観測値

	ケーソン残留変位(m)		最大応答加速度(Gal)	
	水平	鉛直	ケーソン	背後地表
CASE1	0.89	0.21	247	
CASE2	1.20	0.21	219	161
CASE3	1.28	0.22	229	159
実測値	0.8~1.6	0.2~0.5	—	—

5. まとめ

本検討の結果、基礎捨石および裏込石の物性として表-1の設定を行うことで、より被災時の観測結果に適合することが明らかとなり、その妥当性が確認された。

謝辞: 本論文は、FLIPの改良と高度利用法の研究を推進する目的で設立されたFLIP研究会(事務局: (財)沿岸開発技術研究センター他)の活動の一環として実施された研究成果を取りまとめたものである。また、国土交通省近畿地方整備局神戸港湾空港技術調査事務所および北海道開発局港湾空港部港湾技術係には、本解析に用いたデータの提供等でご協力いただいた。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 佐藤, 大竹, 亀山, 佐藤, 飯田, 大塚, 土田, 森, 小堤, 井合, 安田, 非排水有効応力地震応答解析における捨石材のモデル化に関する検討(その1), 第26回地震工学研究発表会講演論文集, 2001(投稿中)
- 2) 岡, 井合, 小堤, 2次元有効応力解析のパラメータ感度解析(その1), 第25回地震工学研究発表会講演論文集, 1999
- 3) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T.: Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility, Soils and Foundations, Vol.32, No.2, pp.1-15, 1992